

実河川における河床波の測定法に関する研究¹

Observational studies on sand waves of Rivers

道上正規²・小田明道³・檜谷治⁴

Masanori MICHIE, Terumichi ODA and Osamu HINOKIDANI

1. はじめに

河川の河床波や水制等河川構造物周辺の局所洗掘に関する研究は多方面でなされているが、しかしそれらの大部分は実験水路の実験データの解析であったり、理論的な考察に限定されている。その理由としては、従来出水時の実河川における河床波の測定が観測者の安全や、計測器の制約のためその測定が非常に困難であったため、もっぱら上述の実験水路における河床波の研究に限られていた。しかし最近では精密でなおかつ軽量の音響測深機の開発。さらに従来、軍事用のみで使用されていた高度な3次元自動追尾装置（トータルステーション）技術の市販化がなされてきた。よってこれらの器具を使用すれば、洪水時の河床波や構造物の局所洗掘の測定も可能になると考えられる。このような成果は河道計画を立てるための粗度係数 n 値の評価に貢献すると同時に、いまだよく知られていない洪水時の河床形態の把握に資するものと期待される。

本研究では、木下らの^{1)・2)}知見をもとに、まず安価にRCエアポートをソレックス（株）会社と共同開発し、それに軽量化された音響測深機を搭載して、無人で河川の河床波を測定しようとするシステムを開発するものである。さらに現地データを集積し、操船技術や精度の評価を検証する。

2. 観測方法及び基礎実験

2.1 観測方法と観測機器の構成

現地観測における観測機器構成を図-1に示す。図中より、観測に用いられる主な装置は、河岸、橋上から操縦する無人ラジオコントロールエアポート（以後RCエアポート）、水面から河床の水深を計測するため、RCエアポートに搭載した音響測深機、RCエアポートの位置を計測するためのトータルステーション（自動追尾装置）とそれぞれのデータ収集のために用いられるデータコレクタとパソコンで構成されている。これらを用いて観測を行い収集したこれらの同時刻のデータをつき合わせて出水時の河床形状を把握しようとするものである。

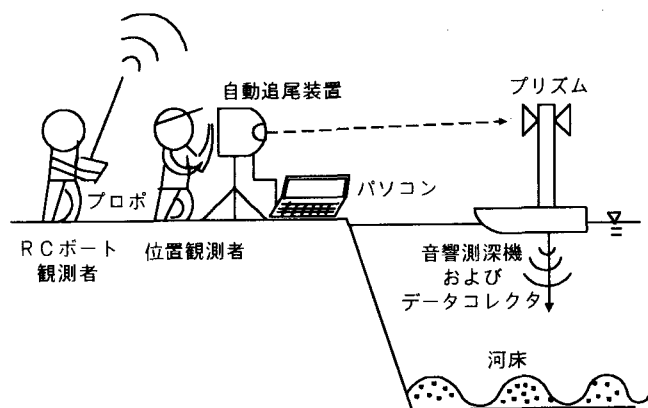


図-1 観測機器構成の概略

ソレックス（株）と共同開発したRCエアポートは、図-2に示すように船型は単胴、材質はFRPで

¹ キーワード：河床波，現地観測，洪水，水制

² 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680 鳥取市湖山南 4-101)

³ 鳥取大学技官 工学部土木工学科

⁴ 鳥取大学助教授 工学部土木工学科

全長 200cm, 幅 85cm, 高さ 85cm, の大きさを有している。またエンジントラブルによるRCエアポート流出防止のため62ccのエンジンを2機搭載しており,その最大速度は8m/sで,ある程度の出水においても川を遡上することが可能である。このRCエアポートは,流下するゴミや水中植物にからまないようにエアプロペラ式である。さらに固く大きな浮遊物,コンクリートブロックにぶつかっても沈まないように内部が補強してある。

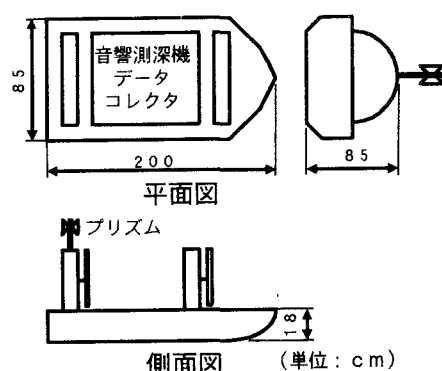


図-2 RCエアポートの形状

次に,3次元自動追尾装置(トプコン(株)製)は,光波によりRCエアポートを連続的に自動追尾できるようにプリズム(反射鏡)をエアポートの上部ボールの周辺に6個設置し,約0.5秒間隔でリアルタイムに3次元位置データ(x,y,z)と時刻t(秒)をパソコンに収集する。またRCエアポートに搭載する音響測深機は,軽量(7kg)で高性能のタマヤ計測(株)社製のものを使用した。音響測深機の性能は,送受信周波数 200kHz,最浅水深 70cm,最大水深 100m,測定精度 $\pm 2\text{cm} \pm \text{水深} \times 1/1000$,送受波器の半減全角約 6度,連続使用時間 6時間,データの収集は記録紙によるアナログとRS-232Cによるデジタル式を併用できようになっている。この音響測深機の大きな特徴は,一般的にスレシヨルド法などで超音波の指向角内の最浅値を深度値とするのに対して,受信波形をA/D変換した状態で合成処理し,その後一番レベルの高い深度を採用しているピーク値検出法を用いている点で,傾斜面などの測定で特に威力を発揮する。さらにこの方法は,洪水時など濁りの多いところで,不連続の信号を受信する条件においても,それらの影響を除去できる特徴を持っている。実河川の測定では,現地において観測前にバーチェック法によって水深データをキャリブレーションした。データの記録は,音響測深機から水深のデジタル値を1秒間に1個接続されたデータコレクタに時間(t)の値と一緒に取り込むデジタルデータと記録紙に出力するアナログデータを併用した。

なお,本手法を用いた観測作業人員は,RCエアポートの操縦と連絡係に各1名,3次元自動追尾装置のデータ収録と船の誘導連絡のために1名,計3名である。ボートの着水,燃料の補給等は全員協力して行った。また,RCエアポートの燃料タンクの大きさにより一回の測定時間は,40分程度である。

2.2 基礎実験

次に現地観測における音響測深機における水深データの精度などを検証するためにRCエアポートの最適速度および河床底面の粒径(河床の粗さ)と河床傾斜の影響についての基礎実験を実施した。

まず,河床の形とRCエアポートの速度の関係について学校のプールで実験をおこなった。ここで使用したプールは,長さ50m,最深部約1.2mである。このプールの最深部に長さ1m×幅0.9m×高さ0.5mの直方体の箱を沈めて,その水面上をさまざまな速度でRCエアポートを通過させて,ボートの速度に対する出力形状の影響を調べた。この結果の一例を図-3に示す。図中より音響測深機のデータサンプリングが1秒間に1個のためボートの移動速度が遅ければ遅いほど河床の形をよく再現できる。また,ここで水深の値は,ほぼ正確に求められている。実河川の河床波の波長が数mとするとRCエアポートの速度を河床に対して1m/s程度にすれば,最低数mスケールの河床波の形を再現できるものと

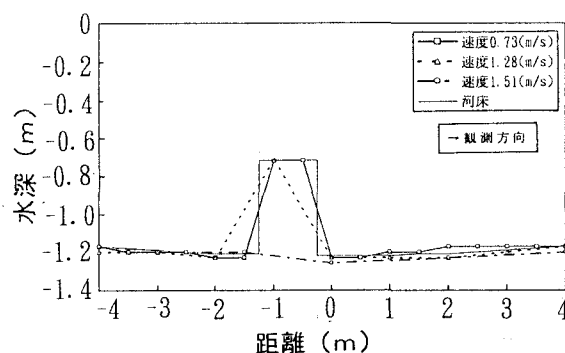


図-3 RCボートの速度変化に伴う河床形状の出力変化

考えられる。

次に、音響測深機の粒径と河床傾斜に対する影響についての実験は、水槽（長さ 1.2m×幅 1.2m×高さ 1m）に、常に水をオーバーフローさせた状態で水槽底部に砂礫の入った箱を沈め、水槽上に R C エアーボートをのせて固定する。その後、音響測深機の感度を最良の状態に調節して、河床面が平坦な場合と 30 度（砂の水中安息角程度）傾斜させた場合についてそれぞれ粒径を変化させて実験を行った。この時、計測に使用した時間は 3 分間、1 秒毎に計 180 個の水深データをサンプリングした。な

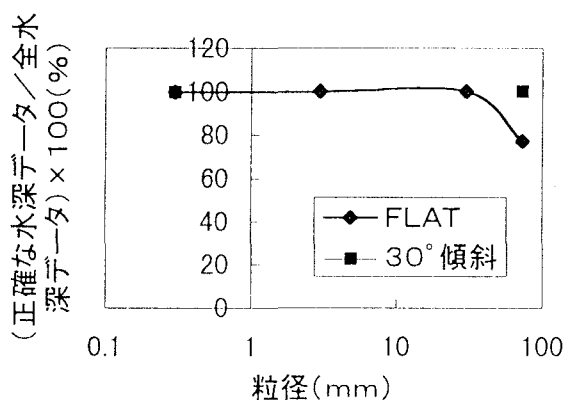


図-4 河床材料の違いによるノイズの発生率

お、実験に用いた砂礫の平均粒径は、 $d_m = 0.3\text{mm}, 3\text{mm}, 30\text{mm}, 73\text{mm}$ の 4 種類の一様砂礫である。この実験結果を図-4 に示す。図中より、横軸は河床材料の粒径、縦軸は直接測定した実測水深と比較して正確なデータが何パーセント得られているかを表している。この実験結果より、粒径が 30mm 以下では、河床の傾斜があってもなくても正確なデータが得られている。粒径が 70mm の時は傾斜している時のほうが正確な値が得られており、平坦の場合は、20%程度正確な値から少しずれる値が存在する。

以上の基礎実験の結果から、実河川で河床波や水制など局所洗掘の測定を行う時、河床の粗さの影響は、粒径 $d_m = 30\text{mm}$ 程度まで無視できる。河床傾斜面の水深のデータも平坦の時と同様に正確に得られることが明らかになった。さらに、数m程度の河床波の測定では、R C エアーボートの速度を 1 (m/s)程度にすればよいことが検証された。

3. 現地観測データの処理方法と結果の考察

3. 1 現地観測の音速補正とデータのノイズ

まず河川水中における音波の伝搬速度は、水温、塩分、場所等によって変化するため観測ごとに音速補正を必要がある。今回は、現地で計測開始前にバッチェック法でキャリブレーションすることによって音速補正を行った。データノイズ原因は、音響測深機の送受波器部分の気泡発生によるもの、エンジンより発生するノイズ、波や急旋回など R C ボートが傾斜することによって発生するもの。さらに、電波によるもの等があげられる。現地におけるデータよりランダムに

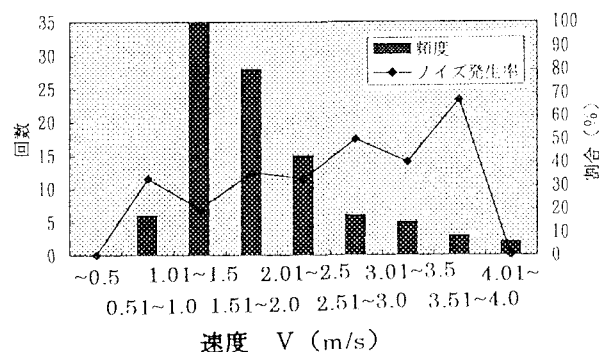


図-5 R C エアーボートの速度とノイズの関係

100 測点を取り出して、R C エアーボートの速度とノイズの関係を調べてみると図-5 のようになる。図中より、実測した時のボートの速度によるノイズの頻度のちがいはあるが、速度が増加するにつれてノイズ発生率が増加している。本 R C ボートでは船底に送受波器をとりつけているが、船底をガラス張りにした遊覧船が速度を速めると、連行する気泡が多くなり、海中の景色が見えなくなるのと同様に、気泡発生によりノイズが発生するものと考えられる。また、速度を速めるとエンジンの回転数も速くなり、エンジンのノイズ発生量が多くなるので、それも出力のノイズの原因と考えられる。

3. 2 観測データの処理方法と考察

現地観測により得られたデータは、図-6 のような手順で処理を行う。まず最初の手順として音響測深機の記録紙のアナログデータより、最大水深を決定し、合わせて音響測深機的最浅限界水深 0.7m 以下の水深

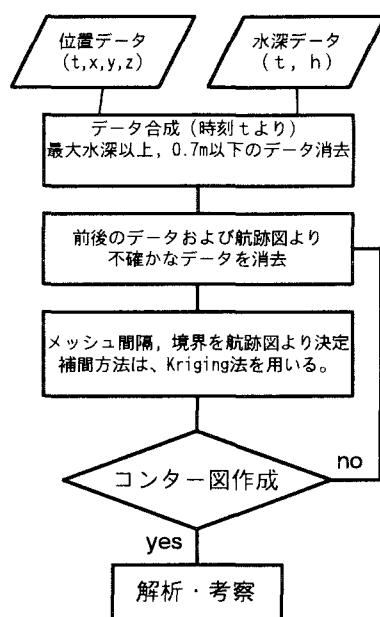


図-6 現地観測データの処理手順

表-1 ノイズデータの一例

t (時間)	h (水深)
14:14:35	-5.0
14:14:36	-5.0
14:14:37	-5.0
14:14:38	0.0
14:14:39	0.0
14:14:40	-4.8
14:14:41	-4.8
14:14:42	-4.8
14:14:43	0.0 . . . (*)
14:14:44	-5.0
14:14:45	-5.0

(単位: m)

データを削除する。その後3次元自動追尾装置の位置(x, y, z)と音響測深機における水深データの同時刻(t)のものを合成する。この合成データから表-1に示すように前後のデータから実際存在しないデータを削除する。以上で、ノイズをカットしたデータ作成を終了する。

次に、河床コンター図の作成を行う。まず観測

区域内に点在するデータを格子データに変換する。この時航跡図を参考にし、その図中のデータ観測点の位置をみながら、格子データの境界を決める。また、格子間隔は原則として格子内に観測データが1個以上存在するように決定する。ここで補間方法は、一般的によく用いられている kriging 法を用いた。この格子データを用いて、河床コンター図を作成する。この図面と航跡図を見てもう1回ノイズ消去を行うかどうか考える。問題がなければ完成図面、格子データとする。その後完成図面を使って解析、考察を行う。この手順

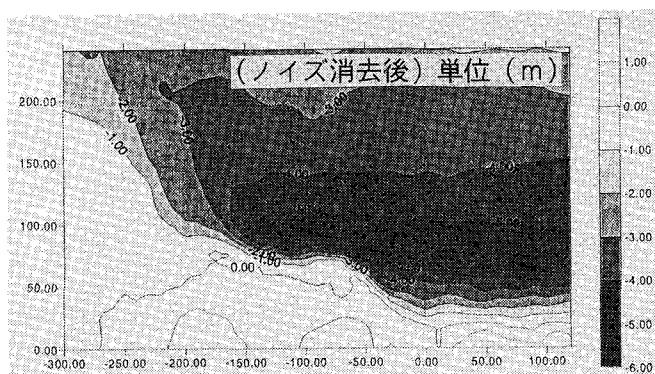
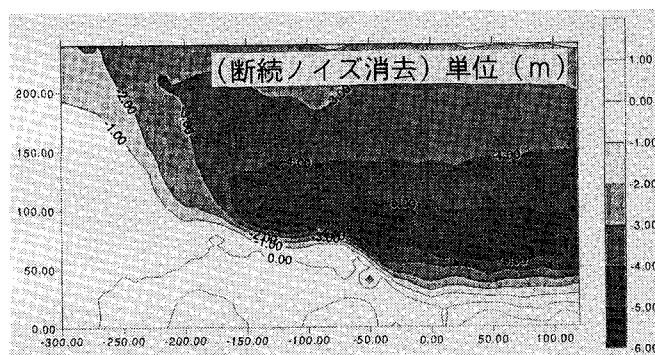
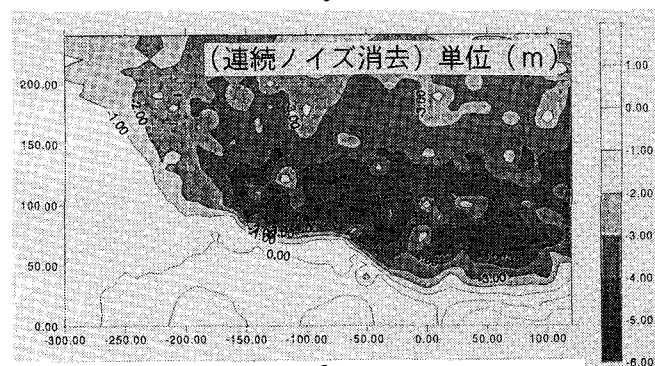
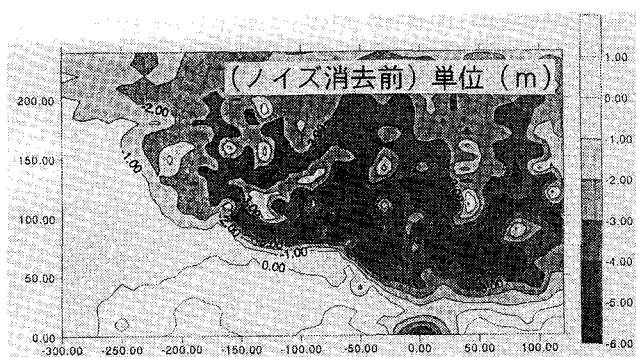


図-7 河床コンター図ノイズ消去

に従って段階的に作成した現地の河床コンター図の一例を図-7（河口左岸水制付近）に示す。図より段階的にノイズが消去され河床コンター図が出来上がっている。この結果、この手順によって、データのノイズをほぼ消去できることが明らかになった。

3. 3 現地観測データの再現性

前述のデータ処理方法、計測手法が正しいかどうかは、実河川の観測において同場所で違う時間帯で観測されたものが同一処理方法によって一致しなければ証明されない。そこで今回は、千代川河口第2水制付近で96年の11月に行った2回の観測データでその検証を試みる。なおこの間に大きな出水、波浪による影響はなかった。二つの図（図-8,9）を比較すると、等深線の流れもほぼ同じでありこの手法と処理手順の妥当性が検証された。

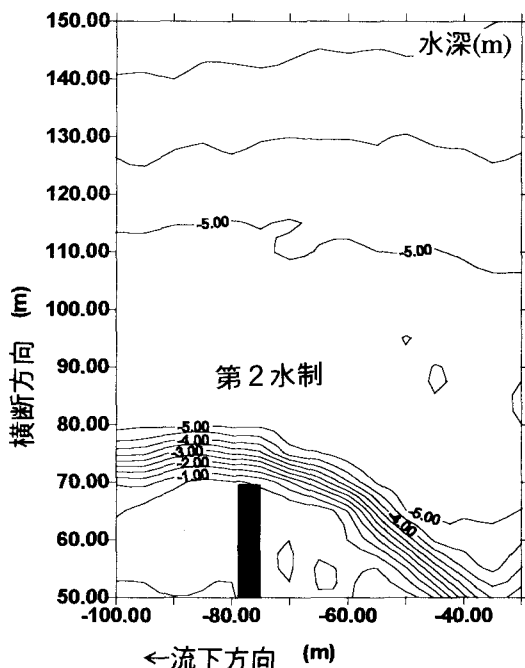


図-8 河口0.6km地点の河床コンター図
1996年11月11日

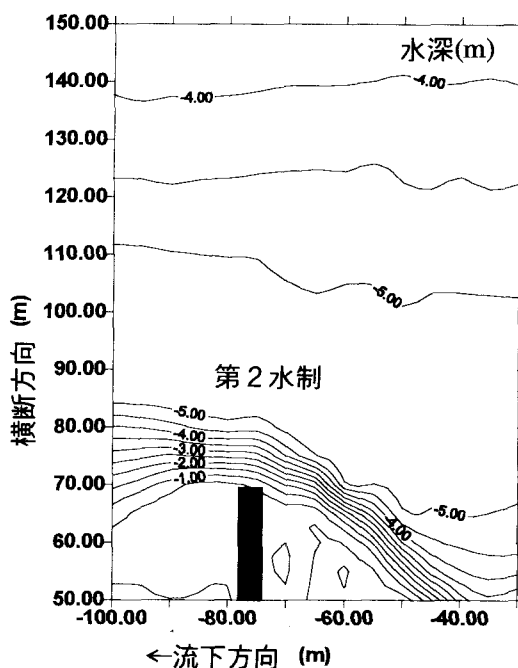


図-9 河口0.6km地点の河床コンター図
1996年11月14日

4. 現地観測の結果と考察

4. 1 観測地点の概要

現地観測は、鳥取県の東部に位置し鳥取市を流れる一級河川千代川の下流部分で実施された。この千代川

表—2 観測場所および日時一覧表

場所	日時	測定開始時間
鳥取大橋右岸 2.8 km地点	7 / 12 (金)	1回目 3 : 15 ~ 4 : 05 2回目 4 : 45 ~ 5 : 35
	11 / 20 (水)	1回目 3 : 12 ~ 3 : 52 2回目 4 : 17 ~ 4 : 57
リバーフレンド左岸 1.2 km地点	7 / 17 (水)	1回目 1 : 30 ~ 2 : 20 2回目 3 : 15 ~ 4 : 05
	7 / 26 (木)	1回目 2 : 05 ~ 2 : 50 2回目 3 : 30 ~ 4 : 20
河口水制付近左岸 0.6 km地点	11 / 11 (月)	1回目 2 : 15 ~ 2 : 45 2回目 3 : 40 ~ 4 : 10
	11 / 14 (木)	1回目 1 : 30 ~ 2 : 00 2回目 4 : 23 ~ 4 : 53

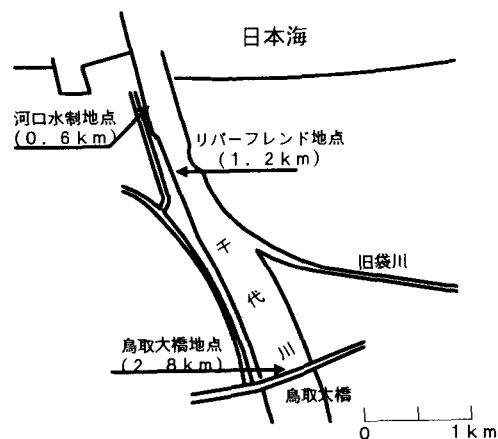


図-10 観測場所全体図

は、流域面積 1200km^2 流路延長 56.8km で中国山地から日本海に注ぎ、河口右岸側に国立公園の一部になっている鳥取砂丘の砂の供給源のひとつとなっている。観測点は、河口から 0.6km の水制左岸地点、 1.2km リバーフレンド左岸、 2.8km 鳥取大橋右岸付近で表-2のような日時で計 12 回観測を実施した。その観測場所は、図-10 に示すように位置している。以後前述の処理手順を用いてそれぞれの現地地形計測の結果について考察を行う。

4. 2 鳥取大橋付近（河口 2.8km 地点）

この観測領域は、鳥取大橋上流部でその河床コンター図、3次元地形図と平面図を図-11 に示す。観測は、鳥取大橋の右岸側にトータルステーションを設置し、その近くから RC エアポートを着水させ実施した。RC エアポートの操縦は、流下方向に直線的（縦断方向）にボートを走らせ易くするため橋上で横断方向に移動して行った。この図の格子間隔は、縦 $5\text{m} \times$ 横 5m である。またこの河床の平均粒径は $d_m = 0.6\text{mm}$ で、基礎実験より水深の測定には問題ない河床である。この地点における自然条件にめぐまれた同時期の航空写真（写真-1）で、水面下に中規模河床形態の形成状況が水面をとおして記録されている。これらの両者を比較すると全体的によく一致していると思われる。

4. 3 リバーフレンド（河口 1.2km 地点）

この地点の河床コンター図、3次元地形図と平面図を図-12 に示す。格子データの領域は、流下方向に 110m 、横断方向に 170m で格子間隔は、 $5\text{m} \times 5\text{m}$ である。図中より、左岸側の水深が深く、右岸側に堆積

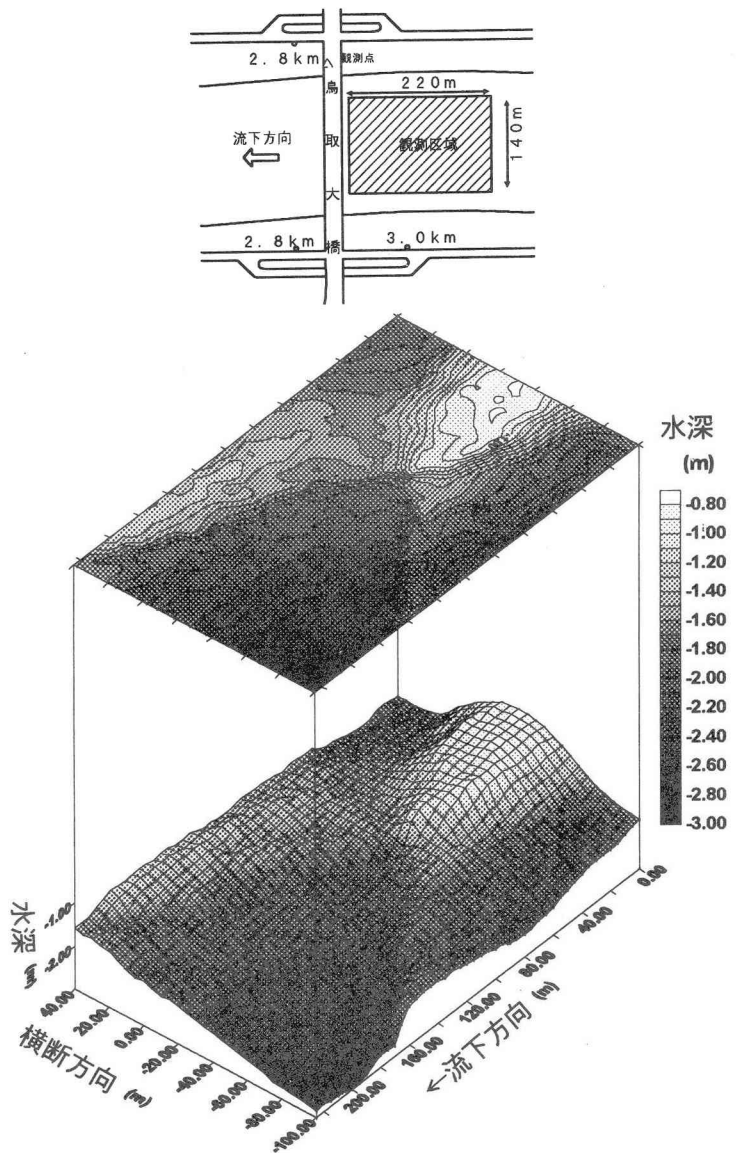


図-11 鳥取大橋付近の河床コンター図



写真-1 鳥取大橋地点（ 2.8km ）1996 年撮影

部分がみられる。この理由として、流心が左岸側によっていることと、河幅（右岸側）が減少していることが原因と考えられる。（写真-2）にも右岸側に水深の浅い所、すなわち堆積部分がはっきり確認できる。またその部分に若干の凹凸がみられるが、これはコンター図中にもみられる。このことは、この部分の水深が

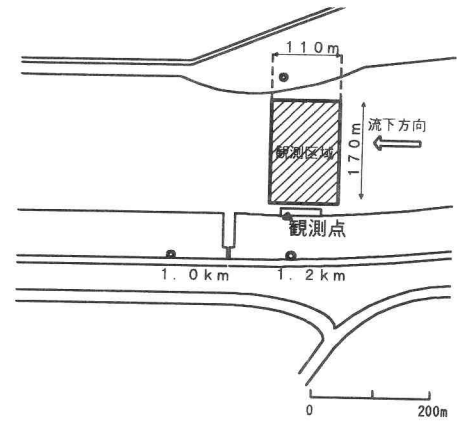


写真-2 リバーフレンド地点 (1.2km) 1996 年撮影

浅かったり、汀線付近のため波浪や河川の出
水の影響をうけるものと考えられる。

4. 4 河口水制付近 (河口から 0.6km 地点)

この付近は、1987 年に河口の付け替えを
行ったところである。河口砂州を左岸側の水
制工で制御することを目的として、河口 640m
地点に第 1 水制、520 地点に第 2 水制が小型
の杭出し水制として 2 基設置された。設置当
初は、波浪の影響で水制のない右岸部に砂が
堆積して左岸の水制周辺部に滞筋があり洗掘
されていたが、現在ではその後の浚渫やさら
に下流側に 4 基の水制を増設することで、第
2 水制付近から下流部で逆に左岸部に堆積が
みられるようになった。今回観測を行ったの
は、この第 1、第 2 水制周辺であり、図-13
からも河口部の水制左岸部の堆積状況が明ら

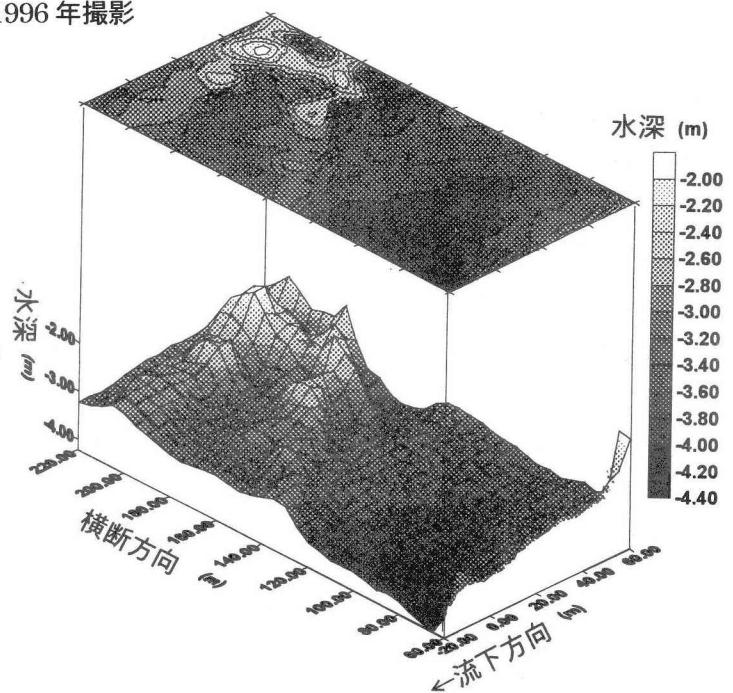


図-12 リバーフレンド (1.2km) の河床コンター図

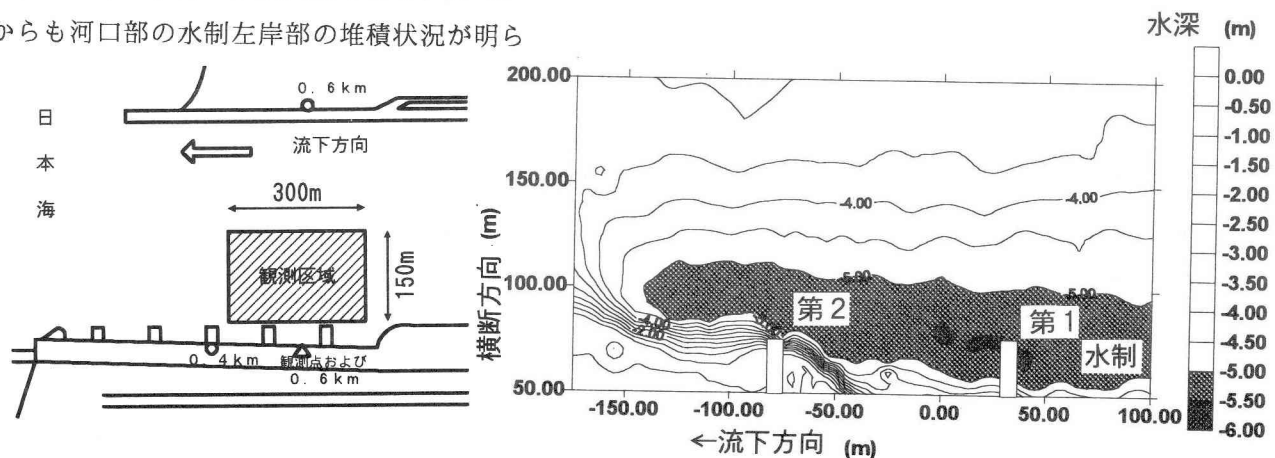
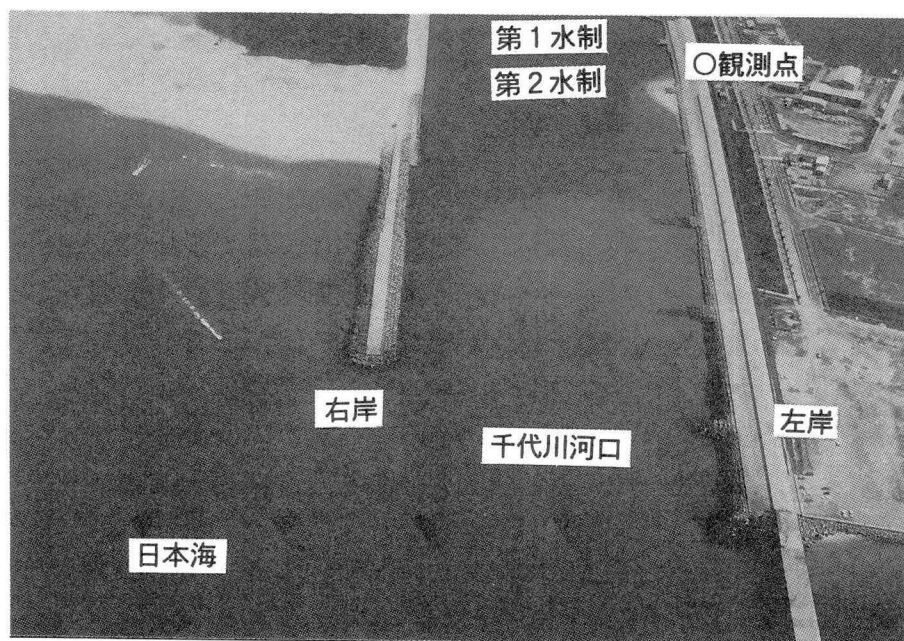


図-13 河床コンター図 (水制地点)

かである。図の作成条件は、格子範囲流下方向に 275m、横断方向に 150m で格子間隔は、5m である。またこの観測は、砂州と 0.7m 以上の部分で船を用いずに測量し、RCエアースポートを用いたデータと合成して作図を行った。図中より、以前左岸側にあった滞筋が、水制増設などによって波浪の影響を受けて第5水制付近から第2水制付近に堆積（写真－3）したものと考えられる。したがって、水制を6基設置したことによっ



写真－3 千代川河口水制付近

て左岸側の滞筋を河川中央に追いやり、堤防付近に砂をつけることに成功したものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、まずRCエアースポートの開発、観測方法の確立をおこなった。次に、データサンプリングにおいて重要と思われるRCエアースポートの最適走行速度、河床の粗さおよび傾斜の影響について基礎実験を行い、ノイズの除去を含めた観測データの処理方法について総合的に検討をおこなった。さらに、前述の知見をもとに、現地観測データの再現性について検証を行った。残念な事に、今回は大規模な出水がなかった。今後は、この観測方法および処理方法をもとに、さらにノイズの問題などの改良を加え、洪水時の河床波や水制周辺の局所洗掘について測定し、その実態を明らかにしたいと考えている。

最後に本研究を遂行するにあたりRCエアースポート製作にあたり御助言をいただいた鳥取大学工学部久保昇三教授、及び実験、観測やデータ整理などに携わっていただいた鳥取大学工学部土木工学科4回生渡部和也、竹本将樹両氏に謝意を表す次第である。さらに、本研究は文部省科学研究費（研究課題番号 06555149）代表 道上正規の援助を受けて行われたものであることを付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 木下良作：洪水時河床音響調査用RCエアースポートの開発，河道の水理と河川環境シンポジウム論文集 pp.215～220,1993
- 2) 井出康郎・渡邊康玄・山下彰司・加治昌秀・崇田徳彦・鳥谷部寿人・金高州吾・三浦敦禎・市川嘉輝：無線転送装置と無人ボートをを用いた河床形状観測，河道の水理と河川環境シンポジウム論文集 pp.197～202,1995